

# **Új jelút-kompenzációs eljárások**

MTA doktori értekezés tézisei

**Dabóczy Tamás**

a műszaki tudomány kandidátusa

habilitált egyetemi docens

Budapest, 2017.

## 1. Bevezetés

Műszaki alkotások nagyon széles körében a körülöttünk lévő fizikai világot valamilyen érzékelő/mérőrendszerrel figyeljük meg. Ezen információ birtokában hoz akár az ember, akár egy autonóm számítógépes rendszer döntéseket, és ez alapján avatkozik be a befogadó környezetbe egy beágyazott rendszer (embedded system). A tárgyak internete (IoT), ill. a kiberfizikai rendszerek világában az eszközök egymással is összeköttetésben vannak, és összehangolva oldanak meg bonyolult feladatokat (autonóm vezetés, adaptív forgalomirányítás, járművek automatikus rajban mozgatása stb.) Ezekben az alkalmazásokban a világról, a fizikai mennyiségekről (tárgyak helyzete, mozgása, hőmérséklet, nyomás stb.) pontos információra van szükségünk. A döntés és beavatkozás helyességét, minőségét alapvetően befolyásolja, hogy az elsődleges információ a fizikai világról mennyire pontos.

Napjainkban a beágyazott és a kiberfizikai rendszerek az információt digitálisan dolgozzák fel. A megfigyelés során a fizikai mennyiségtől a digitális információig tartó jelutat azonban sok torzító és zavaró hatás befolyásolja. Kutatásaim keretében a környezet megfigyelésére szolgáló eszközök pontosságának digitális jelfeldolgozással való javításával (a jelút torzításainak kompenzálásával, zavarásainak csökkentésével) foglalkoztam. Ezek körében súlyponti részek:

- a) a lineárisnak modellezhető rendszerek frekvenciafüggő hibáinak kompenzálása rosszul kondicionált esetben,
- b) a közvetve megfigyelhető rendszerek,
- c) a jelmodell-alapú rekonstrukció.

A tézisfüzet 2. fejezete fejti ki a kutatási célokat. A 3. fejezet az önállóan elért új tudományos eredményeket foglalja össze. A 4. fejezet mutatja be az USA mérési hivatalánál (NIST) implementált műszaki alkotásomat. Az 5. fejezet foglalja össze a tudományos eredmények megtörtént és további lehetséges hasznosítását. Itt sorolom fel az irányításommal, többek közreműködésével elért tudományos eredményeket is.

## 2. Problémafelvetés és kutatási célok

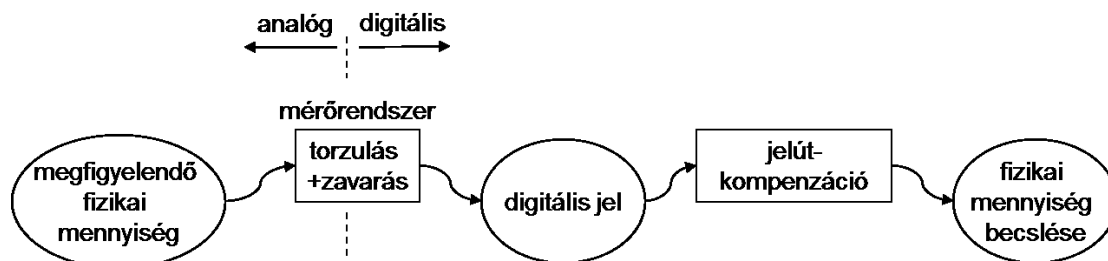
Egy rendszer valamelyik fizikai mennyiségét szeretnénk pontosan mérni. Mivel az adott fizikai folyamat többnyire csak egy torzulást okozó és zajos csatornán (jelúton) keresztül figyelhető meg, a mérési/megfigyelési folyamat részeként célunk ezen torzulás – zavarásokat is figyelembe vevő – kompenzálása. Torzulás, ill. torzítás alatt érték minden ismert, determinisztikus modellel leírható hatást. A nem modellezett vagy sztochasztikus modellel leírható hatásokat összefoglalóan zavarásnak nevezem.

A megfigyelés és a kapcsolódó kompenzáció bonyolultsági szintjei:

1. A megfigyelendő fizikai mennyiség szenzorral közvetlenül megfigyelhető: a jelút-kompenzáció a szenzor ismert vagy identifikált torzításának kompenzálásával kezdődik;
2. A megfigyelendő fizikai mennyiség közvetlenül nem figyelhető meg: a jelút szenzorig vezető szakasza is identifikálandó, és ugyancsak kompenzálásra szorul;
3. A megfigyelendő fizikai mennyiséget és a jelút szenzorig vezető szakaszát további fizikai folyamatok befolyásolják: ezek identifikálása és kompenzálása is szükséges.

## 2.1. A megfigyelendő fizikai mennyiség szenzorral közvetlenül megfigyelhető

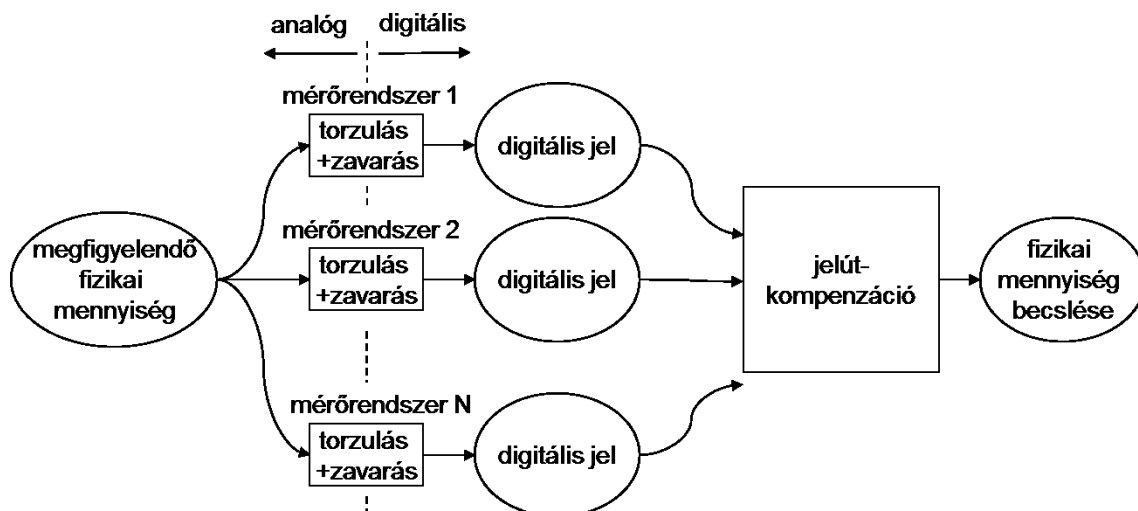
Ebben az esetben a megfigyelendő fizikai mennyiséget egy szenzorral közvetlenül mérjük. A jelút tartalmazza a szenzor, az analóg jelkondicionáló, az AD átalakító és a digitális jelkondicionálás torzító és zavaró hatásait. A torzító hatások közül a leggyakoribb a frekvenciafüggő lineáris torzítás (véges sáv szélesség hatása), a statikus nemlinearitás (pl. telítődő karakterisztika), ill. a memóriával rendelkező nemlinearitás (pl. hiszterézis). Zavarásként jellemzően a mérési zajokat modellezzük. A torzító és zavaró hatások ismeretében lehetőségünk van azok kompenzálására vagy mérséklésére (1. ábra).



1. ábra Mérőrendszer jelút-kompenzációja

Ezt a jelút-kompenzációt (rekonstrukció, inverz probléma) rosszul kondicionáltnak nevezik, ha kis zavarás hatására a becslés nagyban változik [1]. Kutatásaim során ilyen rosszul kondicionált inverz problémákkal foglalkoztam.

A megfigyelendő fizikai mennyiség becslésének pontossága javítható, ha több szenzorral figyeljük meg ugyanazt a fizikai mennyiséget (vagy annak valamilyen hatását). Ilyenkor az egyes megfigyelési csatornákból származó információt úgy fuzionálhatjuk, hogy az figyelembe vegye az adott csatorna megbízhatóságát, pontosságát, véges mérési tartományát vagy zavarásának módját, mértékét [2], [3]. A szenzorfüziónal egy olyan komplex szenzort nyerünk, mely az összes csatorna információját együttesen tartalmazza, és lehetőséget ad az ismert torzulások együttes kompenzálására (2. ábra).



2. ábra Jelút-kompenzáció szenzorfüzió esetén

Kihívások, kutatási területek:

- rosszul kondicionált feladatok esetén frekvenciafüggő lineáris hibák (véges sáv szélesség) kompenzálására új inverz szűrési módszerek kidolgozása,
- rosszul kondicionált feladatok esetén frekvenciafüggő lineáris hibák kompenzálásának automatizálása (automatikus paraméterbeállítás),
- statikus nemlinearitás robusztus kompenzálása,
- memóriával rendelkező nemlinearitás kompenzálása,

- e) hatékony zavarelnyomás jelmodell alapján,
- f) rosszul kondicionált feladatok esetén frekvenciafüggő lineáris hibák kompenzálása SIMO (single input, multiple output) rendszereknél (szenzorfúzió).

Kutatásaimban a b), c) és e) problémakörrel foglalkoztam.

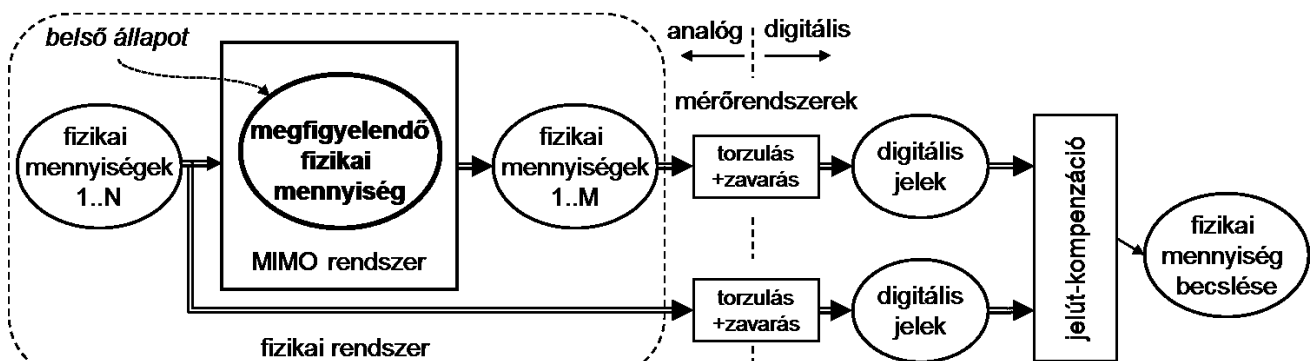
## 2.2. A megfigyelendő fizikai mennyiség közvetlenül nem figyelhető meg

Amennyiben a megfigyelendő fizikai mennyiség szenzorral közvetlenül nem mérhető, de annak valamilyen hatása igen, a jelút-kompenzációs feladat kiegészül a fizikai rendszeren belüli jelterjedés torzításainak és zavarásainak feltérképezésével és korrigálásával. Ha a fizikai rendszeren belüli átvitel leírható ismert paraméterű invertálható torzítással, a mérőrendszer és a fizikai rendszeren belüli jelút torzítását össze lehet vonni, és együttesen kompenzálni az előző alfejezetnek megfelelően (1. ábra). A bonyolultsági szint az extra rendszeridentifikációs lépéssel növekszik az előzőhöz képest (fizikai rendszer és mérőrendszer is identifikálandó).

## 2.3. A megfigyelendő fizikai mennyiség egy több-bemenetű rendszer ismeretlen gerjesztése vagy állapotváltozója

A megfigyelendő fizikai mennyiség megfigyelésének összetettebb formáját a 3. ábra mutatja. A fizikai rendszeren belüli jelutat egyéb – ismeretlen és időben változó – fizikai mennyiségek befolyásolják. Az előző alfejezethez képest az eltérés abban áll, hogy az egyéb fizikai mennyiségek előre nem ismert, időben változó módon befolyásolják a jelutat (mérés zavarása) vagy magát a megfigyelendő fizikai mennyiséget is (állapotjellemző zavarása).

A fenti modellekre gyakorlati példa a gépjárművek sebességmérése a kereket meghajtó tengely fordulatszáma alapján, mely szisztematikus hibaként tartalmazza a kerék nem pontosan ismert gördülési sugarát. Ezt befolyásolja a keréknyomás, a hőmérséklet, a gumi kopása, az út egyenetlensége. Ezek egy része elvben mérhető és kompenzálható, másik része zavarásként vehető csak figyelembe. További példa elektromos járművek akkumulátorának töltöttségi szint becslése, mely a megtehető út becsléséhez szükséges.



3. ábra Jelút-kompenzáció közvetve megfigyelhető fizikai mennyiség esetén

Kihívások, kutatási területek:

- a) időben változó paraméterű rendszerek on-line identifikációja állapotbecsléshez,
- b) korábban nem modellezett torzulások figyelembevétele a fizikai rendszer mennyiségei közötti összefüggések analitikus felírásával, speciális alkalmazásokra adaptálása,
- c) modellérvényesség felügyelete,
- d) megfigyelők által ismertnek feltételezett fizikai paraméterek robusztus becslése.

Kutatásaimban az a) és b) problémakörrel foglalkoztam.

### 3. Önállóan elért új tudományos eredmények

#### 3.1. Mérőrendszer kompenzálása – frekvenciafüggő hibák

Egy fizikai mennyiség 1. ábra szerinti megfigyelésénél elsőként feltételezzünk lineáris, idő-invariáns mérőrendszert, melynek zavarásait egy, a kimenetre redukálható additív zajforrással tudjuk figyelembe venni. Mintavételezett diszkrét jeleket, továbbá belépőfüggvényt és véges mintaregisztrátumot feltételezve az összefüggés egy véges konvolúciós szumma:

$$z(i) = \sum_{j=0}^{N_t-1} h(j)x(i-j) + n(i), \quad (1)$$

ahol  $x(i)$  a mérendő fizikai mennyiség (rendszer bemenőjele),  $h(i)$  a mérőrendszer súlyfüggvénye,  $n(i)$  a zajregisztrátum,  $z(i)$  a véges sáv szélesség miatti torzult és zajos válasz.

Az inverz szűrés (dekonvolúció) feladata az átviteli függvény ismeretében, zajos és torz kimenetet mérve, a rendszer gerjesztésének a becslése. A feladat tipikusan rosszul kondicionált, ami azt jelenti, hogy a megfigyelés kis megváltozása is a bemeneti jel becslőjében nagyon nagy eltérést okoz [1]. A zajerősödés mérséklésére számtalan megoldást javasol az irodalom (kimenet simítása [4], regularizáló operátor [1], [5], Wiener-szűrés [6], [7], Kalman-szűrés [8] [9], jelmodellillesztést [10], neurális hálók [11] stb.) Ezek mindegyike a zajt úgy csillapítja, hogy járulékos hibaként a hasznos jelet torzítja. Az inverz szűrés feladat egyik nagy kihívása a zajelnyomás és a torzulás közötti kompromisszum megtalálása. A módszerek a zajelnyomás mértékének megtalálását tipikusan a felhasználóra bízák. Az értekezésben ennek automatizálására tesztek javaslatot, így nincs szükség külön szakértőre a méréshez, továbbá autonóm rendszerekbe is beépíthetjük az algoritmust.

##### 3.1.1. Több paraméter automatikus optimalizálása

Kidolgoztam egy algoritmust, mely az inverz szűrés (dekonvolúciós) módszerek zajelnyomásának mértékét automatizálja parametrikus algoritmusok esetén (olyan inverz szűrés algoritmusok, melyek egy vagy néhány paraméterrel hangolhatók). A módszer előnye az irodalomban fellelhető algoritmusokhoz képest, hogy a bemeneti hibát minimalizálja, több paramétert képes kezelni, frekvenciatartományban számítható, ezáltal eliminálhatók a számításigényes mátrixműveletek. A paraméteroptimalizáló algoritmus a frekvenciatartományban felírt bemeneti hibát közelíti jelmodellekkel, ahol a modelleket a mérésekből automatikusan építi fel az algoritmus. A bemeneti hiba a következőképpen írható fel:

$$\begin{aligned} \text{cost} &= T_s \sum_{i=0}^{N_t-1} \left( x(i) - \hat{x}(i) \right)^2 = \frac{T_s}{N_f} \sum_{k=0}^{N_f-1} \left| X(k) - \hat{X}(k) \right|^2 = \\ &= \frac{T_s}{N_f} \sum_{k=0}^{N_f-1} \left| X(k) \left( 1 - H(k)K(k, \underline{p}) \right) \right|^2 + \frac{T_s}{N_f} \sum_{k=0}^{N_f-1} \left| N(k)K(k, \underline{p}) \right|^2 - \\ &\quad - \frac{2T_s}{N_f} \sum_{k=0}^{N_f-1} \underbrace{\left| X(k) \left( 1 - H(k)K(k, \underline{p}) \right) \right|}_A \underbrace{\left| N(k)K(k, \underline{p}) \right|}_B \cos(\varphi_{AB}(k, \underline{p})) \\ &= \text{cost}_{\text{bias}} + \text{cost}_{\text{noise}} + \text{cost}_{\text{bias, noise}}, \end{aligned} \quad (2)$$

ahol  $\hat{x}(i)$  a bemenet becslése,  $T_s$  a mintavételi idő, a nagybetűk a megfelelő jelek diszkrét Fourier-transzformáltjai.  $K(f, \underline{p})$  a  $\underline{p}$  paraméterhalmazzal optimalizálható inverz szűrő átviteli

függvénye. Bemutattam, hogy a fenti kifejezés  $\text{cost}_{\text{bias,noise}}$  keresztagja enyhe feltételek mellett elhanyagolható, és a zajregisztrátum, ill. jelspektrum abszolút értékére egy modellt javasoltam. A zajmodellre fehérzajt feltételezek, és a megfigyelés spektrumában a zárótartomány kiértékelésével állapítom meg a zajszintet. (Ha ismert, a zaj színe is modellezhető.) A jelre egy iteratív algoritmussal finomítom a modellt. A kiinduló modellek a következők:

$$|N_{\text{model}}(f)| = \text{const}, \quad |X_{\text{model}}(f)|_0 = \left| \frac{Z(f)}{H(f)} \right|. \quad (3)$$

Amennyiben  $H(f)$  abszolút értéke bárhol nullához nagyon közeli értéket venne fel, a (3) becslő helyett a jelmodellre egy minimális regularizációt alkalmazunk, mely garantáltan nem okoz érdemi torzítást a jelben (nagy biztonsággal alulregularizált). Ezekkel a becslőkkel a költségfüggvény kiszámítható, és a  $\underline{p}$  paraméter halmaz függvényében a minimum meghatározható.

$$\text{cost}^* = \frac{T_s}{N_f} \sum_{k=0}^{N_f-1} |X_{\text{model}}(k)|_0^2 |1 - H(k) K(k, \underline{p}_0)|^2 + \frac{T_s}{N_f} \sum_{k=0}^{N_f-1} |N_{\text{model}}(k)|^2 |K(k, \underline{p}_0)|^2 \quad (4)$$

Az így nyert  $\underline{p}_0$  paraméterrel a jel spektrumának modellje tovább finomítható:

$$|X_{\text{model}}(f)|_{m+1} = |Z(f) K(f, \underline{p}_m)|. \quad (5)$$

A (4) és (5) egyenletekkel leírt iteráció az előre definiált leállási feltétel teljesüléséig folytatandó. A tapasztalat azt mutatja, hogy néhány (5-10) iterációs lépés elegendő. Az iteráció végén a jelrekonstrukció a következőképpen nyerhető:

$$\hat{x}(i) = \text{real} \left\{ \text{IDFT} \left\{ Z(f) K(f, \underline{p}_{\text{végleges}}) \right\} \right\}, \quad (6)$$

ahol IDFT az inverz diszkrét Fourier-transzformációt jelöli. A fenti algoritmussal az inverz szűrő paraméterei automatikusan, felhasználói beavatkozás nélkül számíthatók. Az ehhez szükséges modelleket szintén automatikusan, a mérések spektrumából építem fel.

### 3.1.2. Kétdimenziós jelek automatikus inverz szűrése

A módszert kiterjesztettem kétdimenziós jelek (képek) parametrikus módszerekkel való inverz szűrésére is. Ilyenkor a költségfüggvény a kétdimenziós spektrumnak megfelelő dupla szummába megy át:

$$\begin{aligned} \text{cost}^* = & \frac{1}{N_k N_l} \sum_{k=0}^{N_k-1} \sum_{l=0}^{N_l-1} |X_{\text{model}}(k, l)|^2 |1 - H(k, l) K(k, l, \underline{p})|^2 + \\ & + \frac{1}{N_k N_l} \sum_{k=0}^{N_k-1} \sum_{l=0}^{N_l-1} |N_{\text{model}}(k, l)|^2 |K(k, l, \underline{p})|^2. \end{aligned} \quad (7)$$

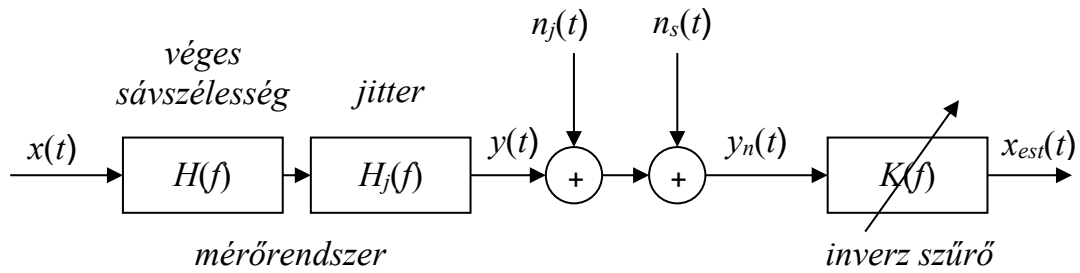
### 3.1.3. Torzulás és bizonytalanság kezelése ekvivalens mintavételező rendszerek esetében

Az ekvivalens mintavételezéskor periodikus jelek esetén a jelet nem szomszédos mintánként tapogattuk le, hanem kihasználjuk azt a tulajdonságot, hogy a periodicitás miatt későbbi periódusokban is van ugyanilyen fázishelyzetű jel, és egy későbbi periódusból vesszük a következő mintát. Ezáltal nagyon nagy látszólagos (ekvivalens) mintavételi frekvencia érhető

el, viszont extra pontos időzítésre van szükség a mintavétel időpillanatának megállapításában és a mintavétel tényleges végrehajtásában. Ezt a módszert alkalmazzák az ultragyors mintavételező oszcilloszkópok.

Kidolgoztam egy algoritmust, mely a jitter (mintavétel időpillanatának bizonytalansága) által okozott torzulást csökkenti, és megadja a jitter által okozott bizonytalanságot a becsült jel körüli időfüggő bizonytalansági sávként.

A jitter egy nem stacionárius additív zajjal modellezhető (jel deriváltjától függő zaj). Figyelembe vettem, hogy a mérést még egy, általában stacionárius zajkomponens is terheli (kvantálási zaj, elektromágneses interferenciák, termikus zaj stb.). A kvantálási zaj hatásának csökkentése érdekében sok periódust szokás átlagolni, aminek hatását aluláteresztő szűrőként tudjuk leírni. A torzulást leíró súlyfüggvény a jitter időtartománybeli eloszlásának a valószínűségi sűrűség függvénye. Ez, a nem stacionárius zaj mellett, egy jitterfüggő torzulást is visz a jelbe. A rendszer és a jelút-kompenzáció modellje így a következő, ahol  $n_j(t)$  a nem stacionárius jitterfüggő zaj,  $n_s(t)$  pedig a stacionárius zaj az átlagolás után:



4. ábra Ekvivalens mintavételező rendszerek jelút-kompenzációjának modellje

Céлом a jitter torzító hatásának csökkentése dekonvolúcióval, és a kompenzáció bizonytalanságának származtatása. A becslés felírható a frekvenciatartományban:

$$\begin{aligned} X_{est}(f) &= X(f)H(f)H_j(f)K(f) + N_j(f)K(f) + N_s(f)K(f) = \\ &= X(f) + \underbrace{X(f)(H(f)H_j(f)K(f) - 1)}_{bias} + \underbrace{N_j(f)K(f) + N_s(f)K(f)}_{noise}, \end{aligned} \quad (8)$$

ahol *bias* a torzulás, *noise* a sztochasztikus tagot jelöli. Az inverz szűrés során figyelembe veszem mind a véges sávszélesség, mind a jitter frekvenciatartománybeli torzító hatását.

Kidolgoztam egy algoritmust, mellyel hatékonyan tudom becsülni a jitter által okozott bizonytalanságot. A zajszintek becslésénél ugrásjellegű gerjesztést feltételezek. Ez az ultragyors oszcilloszkópok és más nagyfrekvenciás eszközök kalibrálásánál szokásos. A beállási idő (settling time) után a jel jórészt csak stacionárius zajt tartalmaz, a jitter hatása elhanyagolható. A stacionárius zaj varianciája becsülhető ezen rész adott időpillanatában vett korrigált tapasztalati szórásnégyzetével ( $std\_n_s(t_{topline})^2$ ). Az ugrásrész meredek felfutása mind stacionárius, mind jitterfüggő zajt tartalmaz. Ezen részből nyert tapasztalati szórásnégyzet adja a két zaj együttes varianciájának becslőjét ( $std\_n_o(t_{edge})^2$ ). Mindkét esetben a variancia-becslőt a periodikus jel adott időpillanatában, különböző mintaregisztrátumokból vett jelsorozatból származtatjuk. A két zaj független egymástól, így a jitter okozta amplitúdózaj szórására a következő becslő adható:

$$std\_n_j(t_{edge}) = \sqrt{std\_n_o(t_{edge})^2 - std\_n_s(t_{topline})^2}, \quad (9)$$

ahol  $t_{edge}$  a felfutó él-,  $t_{topline}$  a beállítás utáni tetővonal jelszakaszok egy adott időpillanatát jelölik,  $std\_n$  pedig a szórás becslője. (Itt a jitter okozta zaj szórását nullának becsülöm, amennyiben a tetővonal szórására nagyobb érték adódna, mint a felfutó élére.) A jitter okozta zajt az időtartományban a jel deriváltja alapján extrapolálom:

$$std\_n_j(i) = \text{diff}\{y_n(i)\} \frac{std\_n_j(t_{edge})}{\text{diff}\{y_n(i)\}|_{t_{edge}}}, \quad (10)$$

ahol  $\text{diff}$  a középpontosan számított véges differenciát jelöli. A következő lépés ennek a szórásnak az inverz szűrő kimenetére való transzformálása:

$$std\_n_{s,invfilt} = std\_n_s \sqrt{\frac{1}{N_f} \sum_{k=0}^{N_f-1} |K(k)|^2}, \quad std\_n_{j,invfilt}[i] = \sqrt{std\_n_j^2(i) * k^2(i)}, \quad (11)$$

ahol  $k(i)$  az inverz szűrő súlyfüggvényét,  $*$  pedig a konvolúciót jelöli. Mivel a két zaj független egymástól, a szórások négyzetesen összegeezhetők. Ezek alapján az adott konfidenciaszintnek megfelelő bizonytalansági sávot a következő kifejezéssel adom meg:

$$uncert\_x_{est,invfilt}(i) = b \sqrt{std\_n_{s,invfilt}^2 + std\_n_{j,invfilt}(i)^2}, \quad (12)$$

ahol  $uncert\_x_{est,invfilt}(i)$  a jelrekonstrukció bizonytalansága,  $b$  szorzófaktor hordozza azt az információt, hogy milyen konfidenciaszintnek feleltetjük meg a bizonytalansági sávot.

### 3.1.4. Inverz szűrés alkalmazása markerbázisú mozgásanalízisre hosszú expozíciós idő esetén

Nagyon sok mérnöki feladat esetén szükséges a pozíció és orientáció mérése, mint például mozgásanalízis a sportban vagy az orvosi diagnosztikában, robotvezérlésnél, mechanikai struktúrák analízisének. Ennek egyik bevett módszere a markerbázisú optikai mérés. A vizsgálandó objektumra egy vagy több passzív vagy aktív markert helyeznek fel, és egy kamerával követik a mozgást. A markerek képe a kamera érzékelőjén célszerűen körkép, mozgások 3D-ben történő vizsgálatához gömb alakú markereket használnak. Pozíciójának a markerkép középpontját tekintik, amit geometriai centroiddal számolnak a leggyakrabban. Rossz fényviszonyok mellett hosszú expozíciós idő szükséges a megfelelő jelszint eléréséhez. Ilyenkor a mozgás sebességétől függően a markerkép elmosódik, a marker „csóvát húz”. Levezettem az elmosódott markerkép esetére a geometria centroiddal kiszámolt középpontbecslés hibáját mind pontszerű, mind kiterjedt marker esetére. Bemutattam, hogy a torzulás a mozgás frekvenciájától függ. A torzulás szükség esetén kompenzálható:

$$H(f) = \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau}, \quad H_{inv}(f) = \begin{cases} \frac{\pi f \tau}{\sin(\pi f \tau)} & \text{ha } 0 < f < f_s/2 \\ 1 & \text{ha } f = 0 \end{cases}, \quad (13)$$

ahol  $\tau$  az expozíciós idő. A torzulást úgy értelmezzük, mint a markermozgás Fourier-komponenseinek amplitúdócsökkenését. A fenti összefüggés lehetőséget ad a mérés tervezésére (expozíciós idő, apertúra, ISO érzékenység összehangolása) a fényviszonyok, a mozgás sebessége és a kívánt pontosság függvényében. Tekintve, hogy a torzulást ismerjük, lehetőségünk van annak kompenzálására (inverz szűrés).



**1. tézis** Módszereket dolgoztam ki dekonvolúciós feladatok megoldására. Algoritmust adtam parametrikus dekonvolúciós módszerek regularizációs paramétereinek automatikus beállítására. Megoldást adtam ultragyors mintavételt alkalmazó eszközök ekvivalens mintavételezése során fellépő apertúrajitter által okozott frekvenciafüggő torzulás kompenzálására, és meghatároztam a rekonstrukció bizonytalanságát. Levezettem markerbázisú pozíciómérés hibáját hosszú expozíciós idő esetére.

### 1.1 altézis

A tranziens jelek parametrikus dekonvolúciós algoritmusaihoz – kandidátusi értekezésem keretében – kifejlesztett paraméteroptimalizálási módszert továbbfejlesztettem többparaméteres optimalizálás esetére, így lehetőség nyílt több regularizáló operátor együttes alkalmazására és automatikus beállítására. Az algoritmust a (3)-(6) egyenletek adják meg. Az algoritmus előnye más optimalizáló algoritmusokhoz képest: (a) a bemeneti hibát minimalizálja, (b) több paramétert képes kezelni, (c) frekvenciatartományban számítható, ezáltal eliminálhatók a számításigényes mátrixműveletek.

Kapcsolódó publikáció: [DT8], [DT18]

### 1.2 altézis

A többparaméteres dekonvolúciós algoritmusok optimalizációs módszerét adaptáltam ultragyors mintavevő rendszerekhez.

Kapcsolódó publikáció: [DT5], [DT16].

### 1.3 altézis

Az általam javasolt paraméteres dekonvolúciós algoritmusok optimalizációs módszerét kiterjesztettem kétdimenziós jelek (képfeldolgozás) dekonvolúciójának paraméteroptimalizálására. A regularizáló operátor paraméterének meghatározása a (7) költségfüggvény  $p$  paraméter szerinti minimalizálása mellett történik. Ezzel a szférikus aberráció, rosszul fókuszált kamera és az elmozdult kép korrekciója tehető automatikussá.

Kapcsolódó publikáció: [DT4], [DT14].

### 1.4. altézis

Kidolgoztam egy algoritmust, mellyel az ultragyors mintavevő rendszer időzítési bizonytalansága (jittere) által okozott torzulás kompenzálásakor számítható a bizonytalansági intervallum (bizonytalansági sáv a kompenzált jel körül). Az algoritmust a (9)-(12) egyenletek adják meg.

Kapcsolódó publikáció: [DT6], [DT15].

### 1.5. altézis

Levezettem a markerbázisú pozíciómérés szisztematikus hibáját hosszú expozíciós idő esetére, amikor a marker elmosódik a képen. A torzulást a (13) egyenlet adja meg. Ez lehetőséget ad a mérés tervezésére (expozíciós idő, ISO érzékenység, apertúra összehangolása), és szükség esetén inverz szűréssel a hiba kompenzálására (13) szerint.

Kapcsolódó publikáció: [DT1].

### 3.2. Dekonvolúciós módszerek alkalmazása nem parametrikus rendszeridentifikációra

A rendszeridentifikáció a jelrekonstrukció során a jelút-torzítás felderítését jelenti. A nem parametrikus rendszeridentifikáció a lineáris és időinvariáns rendszer súlyfüggvényét határozza meg minden mintavételi időpillanatban. Ez a jelrekonstrukcióhoz hasonlóan egy dekonvolúciós feladat. Az identifikáció során a rendszer gerjesztését tartjuk kézben, a kimenetet mérjük, és ez alapján becsüljük a súlyfüggvényt. Amennyiben a gerjesztőjel alakja nem ismert nagy pontossággal, vagy a jelgenerátor stabilitása nem biztosított, a gerjesztőjelet is vissza kell mérnünk. Ez a mérés további hibaforrást jelent, amit egy bemeneti additív mérési zajjal modellezhetünk. (A zaj csak mérési zaj, tehát a rendszert a zajmentes jel gerjeszti.)

A dekonvolúciós feladat automatikus paraméteroptimalizálását levezetem az identifikáció esetére is. Ehhez a (4)-nek megfelelő költségfüggvényt kell felírunk, figyelembe véve, hogy ki- és bemeneti mérési zaj is terheli a megfigyelést:

$$\begin{aligned} \text{cost}^* = & \frac{T_s}{N_f} \sum_{k=0}^{N_f-1} |H_{\text{model}}(k)|^2 |1 - X_n(k)K(k, \underline{p})|^2 + \\ & + \frac{T_s}{N_f} \sum_{k=0}^{N_f-1} \left( |N_{y,\text{model}}(k)|^2 + |N_{x,\text{model}}(k)|^2 |H_{\text{model}}(k)|^2 \right) |K(k, \underline{p})|^2, \end{aligned} \quad (14)$$

ahol  $|N_{x,\text{model}}(f)|$  a bemeneti-,  $|N_{y,\text{model}}(f)|$  a kimeneti zaj spektrális modelljét írja le,  $X_n(f)$  a (zajos) visszamért gerjesztőjel,  $K(f, \underline{p})$  az inverz szűrő.  $|H_{\text{model}}(f)|$  az átviteli függvény abszolút értékének modellje, melyet az 1. tézisben leírtaknak megfelelően egy iteratív algoritmussal folyamatosan finomítunk. A kezdeti becslést  $|H_{\text{model}}(f)|_0 = |Y_n(f)/X_n(f)|$ , vagy ennek minimálisan regularizált változata adja, ahol  $Y_n(f)$  a zajos kimenet spektruma. A (14) költségfüggvényt  $\underline{p}$  paraméterhalmaz szerint minimalizáljuk, mely egy becslést ad a súlyfüggvény adott modellek melletti optimális regularizációs paramétereire. Ezen súlyfüggvény Fourier-transzformáltjának abszolút értéke szolgáltatja a következő iterációs lépéshez a modell becslőjét:

$$|H_{\text{model}}(f)|_{m+1} = \left| \frac{Y_n(f)}{X_n(f)} R(f, \underline{p}_m) \right|. \quad (15)$$

Itt  $R(f, \underline{p}) = K(f, \underline{p}) X_n(f)$  a regularizáló függvény. Az iterációt addig folytatjuk, amíg a regularizációs paraméterek be nem állnak (tipikusan 5-10 lépés). A stabilizálódott paraméterek adják a nem parametrikus identifikáció regularizáló operátorainak becsült optimumát:

$$\hat{H}(f) = Y_n(f) K(f, \underline{p}_{\text{final}}) = \frac{Y_n(f)}{X_n(f)} R(f, \underline{p}_{\text{final}}). \quad (16)$$

Ezzel a ki- és bemeneti zajt is tartalmazó dekonvolúciós probléma automatikus paraméteroptimalizálását is kezelni tudjuk. A módszer alkalmas arra is, hogy jelrekonstrukciós feladat esetén az ismertnek feltételezett súlyfüggvény bizonytalanságát modellezzük.

**2. tézis** Új eljárást dolgoztam ki nemparametrikus identifikáció regularizáló operátorainak paraméterbecslésére.

### 2.1 altézés

Kiterjesztettem a parametrikus dekonvolúciós algoritmusok paraméteroptimalizációját úgy, hogy az figyelembe vegye az ismertnek feltételezett súlyfüggvény bizonytalanságát, valamint nemparametrikus identifikáció esetén a szokásos kimeneti zajmodell mellett a bemeneti zajmodellt is. Az algoritmust a (14)-(16) egyenletek adják.

Kapcsolódó publikáció: [DT7], [DT17].

### 2.2 altézés

Megmutattam, hogy a tranziens jelek rekonstrukcióját megelőző rendszeridentifikáció során alulregularizálás hatása lényegesen kedvezőbb, mint a túlregularizálás, mert az identifikációs lépésnél túlzott zajelnyomás alkalmazása a jelrekonstrukciós fázis kondicionáltságát rontja. Megmutattam, hogy a jelrekonstrukció szempontjából az is tolerálható, ha az identifikációs fázisban egyáltalán nem használunk regularizáló operátort.

Kapcsolódó publikáció: [DT13].

Itt maga az identifikáció nemparametrikus abban az értelemben, hogy a rendszer becsült súlyfüggvénye mintavett pontok formájában rekonstruálható, de ennek becslése során a regularizációs operátor továbbra is parametrikus.

## 3.3. Jelmodell alapú rekonstrukció

A jelrekonstrukció hatékonyságát növeli, ha a rendszer gerjesztése felírható egy véges paraméterű jelmodell formájában. A rekonstrukció során a zajjal szembeni immunitást a modell véges fokszáma biztosítja. Ilyen gerjesztőjelek jól alkalmazhatók diagnosztikai célra is, ahol a jelalak torzulásából tudunk következtetni a vizsgálandó rendszer tulajdonságaira.

Az egyik leggyakoribb ilyen vizsgálójel a periodikus jel, mely néhány szinuszos komponenssel leírható (multiszinusz). A harmonikus komponenseket a spektrális tartományban a DFT segítségével számíthatjuk. A spektrális felbontás egy alternatív megvalósítása a megfigyelőelméleten alapuló rekurzív Fourier-analizátor [12], mely hatékonyan alkalmazható beágyazott rendszerekben való implementációra. A struktúra a rekurzív számításnak köszönhetően kis számításigényű, és robusztus a zavarokra, számítási hibákra. További előnyös tulajdonsága a DFT-hez képest, hogy szűrőbankjának frekvenciaosztásköze szabadon hangolható. Ezáltal nem szükséges biztosítani, hogy a mintavételi frekvencia pontosan a jel alapharmonikusának megfelelően legyen beállítva. Ez több szempontból is előnyös. Egyrészt beágyazott rendszerekben (és egyéb mintavevő rendszerekben is) a mintavételi frekvencia nem hangolható tetszőlegesen finom felbontással, ezáltal nem biztosítható a szivárgásmentes spektrumbecslés  $f_s/N$  lépésközü DFT-vel. Másrészről a megfigyelendő jel frekvenciája nem is feltétlenül ismert előre.

Az ismeretlen frekvenciára való hangoláshoz a feltételezett alapharmonikus csatornájának Fourier-együttható becselőjét kell megfigyelni. Frekvenciahiba esetén ez a komplex számsíkon körbeforog. A forgási sebesség arányos a frekvenciahibával. Ennek megmérése lehetőséget ad a szűrőbank bázisfüggvényeinek áthangolására. Ezt az eljárást nevezik Adaptív Fourier-Analizátornak (AFA) [13]:

$$\omega_{1,n+1} = \omega_{1,n} + \frac{1}{N} \text{angle}(\hat{X}_{1,n+1}, \hat{X}_{1,n}) \quad (17)$$

ahol  $\omega_{1,n}$  jelöli a jel alapharmonikusának körfrekvenciájára tett becslést az  $n$ . lépésben,  $\hat{X}_{1,n}$  jelöli az alapharmonikusnak megfelelő csatorna integrátorának kimenetét, és  $\text{angle}(\cdot, \cdot)$  a két komplex szám által bezárt szöget jelenti. Az Adaptív Fourier-Analizátor lehetőséget biztosít multiszinuszos jel hatékony detektálására, paramétereinek mérésére ismeretlen vagy lassan kúszó frekvencia esetén (rövid idejű instabilitás).

### 3.3.1. Új frekvenciaadaptációs algoritmus az Adaptív Fourier-Analizátorhoz

A (17) szerinti frekvenciaadaptáció a zajjal szembeni immunitás érdekében a frekvenciahiba korrekcióját  $N$  lépésre osztja szét. Ennek robusztus változataira a szakirodalomban következő javaslatok születtek:

*Robust AFA (rAFA)*: frekvenciahiba korrekciójának szétoztása  $N \cdot Q_{damp, AFA}$  lépésre.

*Improved robust AFA (irAFA)*: a frekvenciahiba mérése során  $B$  egymás utáni Fourier-komponens átlagának összehasonlítása [14] [15].

*Block AFA*: a frekvenciahiba mérése során egymástól  $P$  távolságra lévő Fourier-komponensek összehasonlítása [16].

A fenti módszerek kombinációjaként egy új frekvenciaadaptációs algoritmust javasoltam, mely egyszerre hangolhatóan vezeti be az előző módszereket:

*Extended improved robust AFA (eirAFA)*:

$$\omega_{1,n+1} = \omega_{1,n} + \frac{1}{N \cdot P \cdot Q_{damp, AFA}} \text{angle}(\hat{X}_{aver(1,n)}, \hat{X}_{aver(1,n-P)}), \quad \hat{X}_{aver(1,n)} = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \hat{X}_{1,n+1-b} \quad (18)$$

A három paraméter ( $P, B, Q_{damp}$ ) hangolásával különböző szempontok hangsúlyozhatók.

### 3.3.2. Adaptív Fourier-Analizátor alkalmazása AD átalakítók tesztelésére

AD átalakítók statikus és dinamikus tulajdonságainak meghatározásához egy nagy tisztaságú szinuszzel gerjesztik a rendszert. A mért jel tulajdonságait a referenciajeltől való eltérés alapján számolják, ahol a referenciajelet a mért jelhez való szinuszillesztés biztosítja. A mérés pontossága növelhető, ha a mintavett pontok számát megnöveljük. Nagyon hosszú mintarekordok esetén (több millió minta) a szinuszillesztés paraméterérzékenysége nagyban megnövekszik a kiinduló frekvenciabecslő tekintetében. A szinuszillesztés helyett ezért kidolgoztam az Adaptív Fourier-Analizátor adaptálását, mely a jelgenerátor rövid idejű instabilitását képes jelezni, és igény esetén követni, kompenzálni is. Az algoritmust az I. táblázat foglalja össze. A fenti tulajdonságok egyben azt is lehetővé teszik, hogy beágyazott számítógépes rendszerekben a mikrokontroller vagy DSP beépített AD átalakítóját akkor is hatékonyan teszteljük, amikor nem a jelgenerátor, hanem a mintavételi időzítő órajelének rövid-, és/vagy hosszú idejű stabilitása nem biztosított.

### 3. tézis

AD átalakítók dinamikus tulajdonságainak meghatározásához robusztus algoritmust dolgoztam ki nagyon hosszú mintaregisztrátumok (több millió minta) esetére. Ezzel kiküszöbölhető a hagyományos négyparaméteres szinuszillesztés nagyfokú paraméterérzékenysége a kezdeti érték becslőjére, és kezelhetők a jelgenerátor és a mintavevő áramkör rövid idejű instabilitásai.

#### 3.1 altézés

A rekurzív Fourier-analizátor (FA) és az adaptív Fourier-analizátor (AFA) felhasználásával kidolgoztam egy algoritmust, amellyel nagyon hosszú mintaregisztrátumok esetére is megbízhatóan és robusztusan állítható elő az AD átalakítók dinamikus hibáinak (THD, SNR, SINAD stb.) meghatározásakor szükséges referenciajel. Ezzel alkalmassá tettem a tesztelést a szabványban rögzített paraméterek meghatározásán túl a tesztkörnyezet következő nem ideális tulajdonságainak detektálására, ill. kompenzálására:

- detektálható a jelgenerátor frekvenciájának, ill. a mintavétel időzítő áramkörének rövid idejű instabilitása,
- detektálható a jelgenerátor amplitúdó-driftje,
- a fenti két hiba nemcsak detektálható, hanem igény szerint kompenzálható is.

A módszert kiterjesztettem úgy, hogy akkor is alkalmas AD átalakító tesztelésére, amikor a mérés a túlvezérelés következtében a szinusz jel alját és tetejét levágja. Az algoritmust az I. táblázat írja le.

Kapcsolódó publikációk: [DT3], [DT11], [DT12].

#### 3.2 altézés

Továbbfejlesztettem a frekvencia-drift detektálására szolgáló adaptív Fourier-analizátort (AFA) az eddig ismert robusztus változatainak kombinálásával (extended improved robust AFA, eirAFA), mely mind a robusztus AFA, mind a blockAFA, mind a továbbfejlesztett robusztus AFA előnyös tulajdonságait megtartja és paraméterezhetően hangolja. A frekvenciaadaptációs algoritmust (18) írja le. Az így továbbfejlesztett AFA univerzálisan alkalmazható, AD teszteléstől függetlenül.

Kapcsolódó publikáció: [DT10].

#### 3.3 altézés

Levezettem a mintavételi jitter szinuszillesztésre gyakorolt torzító hatását. Az amplitúdóbecslés a következőképpen alakul:

$$E\{A\} = E\{\cos(\omega n(t))\} = E\left\{f\left(\frac{\arccos(y)}{\omega}\right) \frac{1}{\omega\sqrt{1-y^2}}\right\},$$

ahol  $n(t)$  a jitter (ideális mintavételi időponttól való időeltérés) időfüggvénye,  $f(n)$  a jitter valószínűségi sűrűség-függvénye,  $\omega$  a szinusz körfrekvenciája,  $y = \cos(\omega n)$  a jitter nemlineáris transzformációja, „ $A$ ” a szinuszillesztés amplitúdóbecslése.

A jitter időtartománybeli eloszlásának ismeretében a torzulás kompenzálható.

## I. táblázat Robusztus jelillesztési algoritmus AD átalakítók teszteléséhez

1. Négyparaméteres szinuszillesztés a mintaregisztrátum kezdeti, rövid szakaszára → durva kiinduló becslés a szűrőbank frekvenciaosztására.
- 2.a Rekurzív Fourier-analizátor (FA) futtatása. Amennyiben a gerjesztőjel túlvezérelt, a konvergencia gyorsítása érdekében a kezdeti szakasznál a szinuszillesztett jelet vezetjük a Fourier-analizátorra.
- 2.b Az AFA egyik robusztus változatának (rAFA, irAFA, eirAFA) futtatása a rekurzív Fourier-analizátorral párhuzamosan, és a szűrőbank mintánként való újrahangolása.
- 2.c Az FA és AFA adaptálásának tiltása a gerjesztőjel alul- ill. túlvezérlése esetén (hibajel nullával való helyettesítése az alul-/túlvezérelt részeken).
3. A rekurzív Fourier-analizátorból a DC és alapharmonikus komponens kicsatolása, mint referenciajel az ADC teszteléséhez.
4. (Opcionális) Amennyiben az AFA stabil frekvenciát becsül az egész mintaregisztrátum során (nincs fázis-drift), az FA újrafuttatása frekvenciaadaptáció nélkül. A szűrőbank frekvenciaosztását az AFA által becsült alapharmonikus-frekvencia időfüggvényének átlagolásával nyerjük. Ezt követően a frekvenciaadaptáció nélkül újrafuttatott FA-ból a DC és alapharmonikus komponensek szolgáltatják a referenciajelet az ADC teszteléséhez.

## 4. Műszaki alkotások

### 4.1 Dekonvolúciós szoftvercsomag az NIST (USA) kalibrációs laboratóriuma számára

Az USA elsődleges kalibrációs laboratóriuma és kutatóközpontja (NIST, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA) számára adaptáltam az 1. tételben megfogalmazott spektrális modellalapú automatikus inverz szűrési paraméterállítási módszert, és implementáltam ultragyors mintavevő oszcilloszkópok kalibrációs szoftverrendszerébe. Az algoritmus keretrendszerét LabView-ban, az időkritikus részeket C-ben implementáltam. A szoftverem beépült a kalibrációs rendszerbe, ami éveken keresztül a hitelesítés alapja volt.

#### A vonatkozó publikáció:

J. P. Deyst, N. G. Paulter, **T. Dabóczy**, G. N. Stenbacken and T. M. Souders, "A Fast Pulse Oscilloscope Calibration System," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement Vol. 47, No. 5*, pp. 1037-1041, 1998

#### Független hivatkozások a cikkre: 30 db, ezek közül két kiemelt

- [1] Bertocco M, Garbin L, Narduzzi C, „Correction of systematic effects in digitizing oscilloscopes,” *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT* (ISSN: 0018-9456) 52: (3) pp. 871-877. (2003)
- [2] Clement TS, Hale PD, Williams DF, Wang CM, Dienstfrey A, Keenan DA, „Calibration of sampling oscilloscopes with high-speed photodiodes,” *IEEE TRANS MICROWAVE THEORY* 54: (8) pp. 3173-3181. (2006)

### 4.2 Grafikus felhasználói felületet tesztelő szoftver a Matlab FDIDENT Toolbox-ához

A jelút-kompensáció első lépésként a rendszer identifikációját igényli. Kifejlesztettem egy szoftver csomagot, mely a Frequency Domain System Identification Toolbox for Matlab (FDIDENT) grafikus felhasználói felületét teszteli automatikusan, szimulálva a felhasználó

kattintásait és adatbevitelét. Az FDIDENT Toolbox-ot a Mathworks cég (Matlab fejlesztője) éveken keresztül forgalmazta. Az általam kifejlesztett teszter szoftver hozzájárult a toolbox kereskedelmi sikeréhez a megbízhatóság növelésével, garanciális költségek csökkentésével. A teszter szoftvert Matlab nyelven írtam, fejlesztési ideje kb. 1 mérnökhónap.

#### ***A vonatkozó publikáció:***

***Dabóczy T.***, Kollár I, Simon Gy, Megyeri T, „How to test graphical user interfaces,” IEEE INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT MAGAZINE 6:(3) pp. 27-33. (2003)

#### ***Független hivatkozások a cikkre: 20 db, ezek közül két kiemelt***

- [1] Jaafar M F, Selamat M H, Ghani A A, „Test Case Markup Language for Visual Programming Language,” INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE AND NETWORK SECURITY (ISSN: 1738-7906) 7: (9) p. 45. (2007).
- [2] Rajalakshmi M, Vinod Viji, „Critical Evaluation of GUI Software Exception Testing,” International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development (ISSN: 2249-6149) 4: (3) pp. 477-486. (2013)

## **5. Tudományos eredmények hasznosítása és hasznosításának lehetősége**

### ***5.1. Költséghatékony mérőrendszer inverz módszerekkel***

Igen gyakran a külvilág fizikai paramétereinek megfigyelésében (beágyazott rendszerek, mérésadatgyűjtők stb.) nem technológiai, hanem anyagi korlátba ütközünk, azaz létezik pontosabb, precízebb érzékelő vagy mérőberendezés, de annak költségeit az adott alkalmazás nem képes viselni. Ez elsősorban a nagy példányszámban gyártott eszközöknél jelentkezik, hiszen itt az anyag-/alkatrész-költség dominál (pl. autóipar), a fejlesztési költség jobban eloszlik a sok terméken, de egyedi termékeknél is fontos szempont az ár. A teljes jelrögzítési lánc (érzékelő, jelkondicionáló, AD átalakító) javítására kínál lehetőséget a jelek digitális utófeldolgozása. Hordozható, kis költségű permittivitásmérő kialakítását segítette a dekonvolúciós módszer [17]-ben. Okostelefon alkalmazását, és az ezzel járó rossz fókusz kompenzálását kezelik kamerakalibrációs feladatoknál a [18]-ban. Nemlinearitást tudunk hatékonyan kompenzálni (pl. MEMS magnetométer és napszenzor alapú, kis költségű pozícióbecslő [19], jelgenerátorok kalibrálása egyszerű mérőberendezésekkel, ADC nemlinearitásának kompenzálásával [20]).

#### ***Saját eredmény ezen a területen:***

- A többparaméteres optimalizálást sikerrel alkalmaztam nagyfeszültségű osztó frekvenciafüggő hibájának kompenzálására, mely által egy olcsóbb, ún. csillapított kapacitív osztóval is a rezisztív osztók sáv szélességével vetekedő minőség volt elérhető [DT8], [DT18]. A méréseket az ETH Zürich Nagyfeszültségű Laboratóriumában végeztük.
- A beágyazott rendszerekben szokásos szenzorok minőségjavítására is hatékonyan alkalmaztam a sáv szélesség kiterjesztését (pl. gyorsulásmérő) [DT2].
- Jelmodellalapú zavar szűrést sikerrel alkalmaztam AD átalakítók tesztelésére, amikor a nagyon hosszú mérési idő miatt a jelgenerátor, ill. a mintavevő áramkör rövid idejű instabilitását is kezelni tudta az algoritmus [DT3], [DT11], [DT12].

## 5.2. Fizikai/technológiai korlát kiterjesztése inverz módszerekkel

Az inverz szűrési alkalmazások második nagy köre, amikor a mérőrendszer tulajdonságai fizikai vagy technológiai korlátok miatt tovább nem javíthatók.

Nagyon sok orvosi diagnosztikai berendezésnél jelent korlátot a mérési elvből vagy a készülék limitált felbontásából adódó torzítás (pl. ultrahangalapú képalkotó eszközök felbontásának javítása [21], [22], EEG jelek feldolgozása [23]). Optikai képalkotás pontosságát limitálja a szférikus aberráció, a különböző lencsehibák, a rosszul fókuszált lencse, a kép bemozdulása. Ezek egy része szintén kompenzálható [24]. A konvolúciós neurális hálók objektumklasszifikáló képességének további javítását célozzák meg dekonvolúciós lépések közbeiktatásával [25]. Hajók víz alatti mérés alapján való lokalizálásának pontosságát növelik dekonvolúcióval [26]. „Elektromos orr” hatékonyan vethető be az élelmiszeriparban különböző anyagok koncentrációjának mérésére. A mérési elvből következő torzítások kompenzálása inverz módszereket igényel [27]. Forrásszeparálás szintén egy gyakori feladat [28]. Molekuláris biológia területén sejt típusok szeparálása [29], terahertz tartományú roncsolásmentes anyagvizsgálatnál visszhang elválasztása [30], [31], zenei felvételeknél hangszerek hangjának elkülönítése [32] igényel inverz módszereket.

Technológiai korlátba ütközünk a precíziós méréstechnika esetén (tipikusan kalibrációs laboratóriumok műszerei). A kalibrációs laboratóriumok egyik feladata a mérőműszerek hitelesítése, amihez a mérendő műszernél nagyobb pontosságú referenciamérésre van szükség. Amikor a világ legpontosabb műszerét kell hitelesíteni, referenciamérést csak inverz módszerek bevetésével tudunk elvégezni [33], [34].

*Saját eredmények ezen a területen:*

- Az USA elsődleges mérésügyi hivatalánál (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD) találkoztam a precíziós méréstechnika problémakörével, ahol a feladatom ultragyors mintavételező oszcilloszkópok sáv szélességének kiterjesztése volt. A mintavevő rendszer ekvivalens mintavételi üzemmódban működött, az így elért mintavételi frekvencia 512 GHz, sáv szélessége 20 GHz. Hatékonyan alkalmaztam az 1. tézisben leírt automatikus dekonvolúciós algoritmust a sáv szélesség kiterjesztésére, és meghatároztam a jitter által okozott időfüggő bizonytalansági sávot. [DT5], [DT6], [DT15], [DT16]. Elkészítettem egy szoftvercsomagot az NIST számára, mely beépült a kalibrációs mérőrendszerükbe (Lásd Műszaki alkotás, 4. fejezet.)
- Markerbázisú mozgásanalízis pontosságának javítására alkalmaztam inverz szűrést. A rossz fényviszonyok miatt hosszú expozíciós idővel készült kameraképek elmosódnak. Markerek középpontbecslésének a hibáját levezettem, és bemutattam a kompenzálás lehetőségét. Egyúttal analízist adtam a méréstervezéshez: ISO érzékenység, apertúra, záridő hangolása a fényviszonyok és a mozgás sebességének függvényében [DT1].

*Általam vezetett tudományos kutatást végző csoport eredményei:*

- Bakó Tamás doktoranduszhallgatóm nemlineárisan torzult archív akusztikus jelek rekonstruálásával foglalkozott. Itt a problémát az okozza, hogy a felvétel nem ismételhető meg, ezért a jelrögzítő rendszer fizikai javítása nem opció. A nemlinearitás kompenzálása során fellépő zajerősödés kezelésére a dekonvolúciós módszerekből ismert regularizációs technikák adaptálása jelentette a megoldást [DT21], [DT48]. További hatékony algoritmusok születtek zajok (sistergés, kattogás stb.) szűrésére [DT45], [DT46], [DT47]. Bakó Tamás PhD dolgozatát 2005-ben sikeresen megvédte.



### 5.3. Komplex szenzorok

Szenzorok, mérőrendszerek bemeneti jel- és frekvenciatartományát növelhetjük meg több, különböző szenzor alkalmazásával, ahol az információ fuzionálásával egy komplex, új szenzort hozunk létre. Szenzorfüzióval alkalmazások széles körében találkozhatunk.

A bemeneti jeltartomány kiterjesztésére egy egyszerű példa, amikor különböző irányba néző kameraképekből egy panorámaképet szerkesztünk össze az egyes képek megfelelő forgatásával és illesztésével. Gyakran alkalmaznak fúziót ott, ahol a közvetlen mérés csak nagyon költséges eszközökkel lenne lehetséges, viszont több, egyszerűbb szenzorból származó információ fúziójával már jó becslés adható. Példák: minden okostelefonban megtalálható olcsó orientációbecslő (IMU) – forgóalkatrészt tartalmazó giroszkóp helyett – MEMS gyorsulásmérő, szögsebességmérő és magnetométer fuzionálásával. Ugyanilyen fuzionált IMU egységekkel találkozunk modellhelikopterek, drónok stabilizálása, egyensúlyozó robotok szögpozíciójának mérése során. További példa: GPS nélküli lokalizáció [35]. Más alkalmazásokban a mérés pontosságát növelik különböző típusú szenzorok segítségével: gépjármű GPS által szolgáltatott pozíciójának pontosítása járműszenzorokkal [36], orvosi diagnosztika hatékonyságának növelése MRI és CT [37], vagy PET/CT képek fuzionálásával. Az autonóm vezetéshez szükséges a gépjárművek szabad úthosszának becslése, melyhez a lézerszkennerek és a sztereó látórendszer információját fuzionálták [38].

*Általam vezetett tudományos kutatást végző csoport eredményei:*

- Bódis-Szomorú András doktoranduszhallgatóm kutatási területe tárgyak térbeli rekonstrukciója kameraképek alapján [DT25]. A megcélzott alkalmazás gépjárművek automatikus sávon tartása az út trajektóriájának rekonstruálása alapján [DT52]. Ehhez a két oldalsó visszapillantó tükörrre helyezünk fel egy-egy kamerát. A kamerákat először kalibrálni kell, melyet vagy egy offline kalibráció során, vagy haladás közben különböző nézetek alapján tehetünk meg [DT50], [DT51].
- Egyensúlyozó robotokhoz a leggyakrabban kéttengelyű gyorsulásmérőt és szögsebességet mérő giroszkópot alkalmaznak a szabályozáshoz szükséges dőlésszög meghatározására. Megmutattam, hogy a komplementer szűrős szenzorfüzió szisztematikus hibát tartalmaz (parazita gyorsulások torzítása), és egy fizikai modellalapú rekonstrukciót javasoltam a fúzióhoz, mely a szisztematikus hibákat kompenzálja (saját tudományos eredmény). A módszer adott szenzorkombinációban való részletes kidolgozása, a robot fizikai modelljének levezetése, továbbá az algoritmus gyors prototípus rendszerben való implementálása Kalvach Arnold hallgatóm munkája. Az eredményeket közösen publikáltuk [DT36]
- Vitorlásversenyekhez dolgoztunk ki optimális útvonalszámító algoritmust hallgatómmal, Velinszky Lászlóval, mely a hajó közvetlenül nem (vagy nehezen) megfigyelhető műszaki paramétereit sok szenzor jele alapján folyamatosan identifikálja, ami lehetőséget biztosít az optimális siklási szög megállapítására [DT31].

### 5.4. Biztonságkritikus rendszerek

Ez az alkalmazási kör megköveteli, hogy a működést (szenzorokat, jelutakat, jelfeldolgozást) szigorúan ellenőrizzük extra eszközökkel, adott esetben a kritikus egységeket többszörözzük. A többszörözésnek vannak fizikai (nem fér el több szenzor) és anyagi korlátai is. Erre kínál alternatívát egy olyan komplex szenzor, ahol az analitikus redundancia kihasználásával más, a rendszerben egyéb funkciók miatt jelenlévő szenzorok jeleiből becsüljük a kívánt mennyiséget („szenzor nélküli” méréstechnika).

A „szenzor nélküli” mérés a hibatűrési követelménnyel gyakran fordul elő motorok (PMSM, BLDC, AC motorok) szabályozásánál mind gépjárművek [39], [40], [41], mind légi járművek esetén [42]. Sebészeti robotkar megfogási erejének becslésére szintén sikerrel alkalmazták a módszert [43].

*Általam vezetett tudományos kutatást végző csoport eredményei:*

- Gépjárművek elektromos szervokormányának nyomatékszabályozásához szükséges árambecsléshez dolgozott ki irányítással hatékony algoritmusokat Zentai András PhD hallgatóm. Ezzel lehetőség nyílik a felvett áram mérésének alternatív (nem árammérő) szenzorokkal való validálására, hihetőségvizsgálatára, ill. az árammérő meghibásodása esetén annak pótlására. Erre az analitikus redundancia teremt lehetőséget, ugyanis a fázisfeszültségek és a fordulatszám mérésével – a motor fizikai paramétereinek ismeretében – becsülhető az áramfelvétel. A feladat megoldásához a motor paraméteridentifikációja szükséges [DT37], [DT38], [DT39], [DT40], [DT42], [DT43], [DT53].
- Biztonságkritikus rendszerek területén a jelút-kompenzációt ott is bevezethetjük, ahol a biztonságos működést felügyelnünk kell. A hibafelügyeleti rendszerrel szemben nagy robusztusság, zajimmunitás az elvárás. Ezen a területen a CERN-nel (Európai Nukleáris Kutatóközpont, Genf, Svájc) való kutatási együttműködés szolgáltat jó példát. Hajdu Csaba PhD hallgatóm a CERN nagy hadronütköztetőjének (Large Hadron Collider, LHC) felügyeleti rendszeréhez dolgozott ki robusztus, FPGA-ban hatékonyan implementálható modellalapú tesztrendszer, mely a sugárszökést felügyelő mérőrendszer integritását felügyeli [DT19], [DT23], [DT27], [DT28]. Periodikus vizsgálójelek detektálására a jelstruktúra (multiszinuszos amplitúdó- és fázisviszonyai) beépítését javasoltam a rekurzív Fourier-analizátorba, mely lehetővé teszi a vizsgálójel robusztus detektálását, biztosítja az anytime jelleget. Hajdu Csaba dolgozta ki ennek különböző változatait, és algoritmust adott a késleltetés becslésére a mérés szinkronizálásához [DT26].

## 6. Tézisekhez legszorosabban kapcsolódó saját publikációk

### Lektorált impaktfaktoros nemzetközi folyóiratcikkek:

- [DT1] T. Dabóczy, "Analysis of the distortion of marker-based optical position measurement as a function of exposure time," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 65, No. 9, pp. 2023-2034, 2016.
- [DT2] T. B. Bakó and T. Dabóczy, "Improved-speed parameter tuning of deconvolution algorithm," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 65, No. 7, pp. 1568-1576, 2016.
- [DT3] T. Dabóczy, "ADC Testing using a Resonator-Based Observer: Processing very long time records and/or testing systems with limited stability," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 62, No. 5, pp. 1166-1173, 2013.
- [DT4] T. Dabóczy and T. B. Bakó, "Inverse Filtering of Optical Images," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 50, No. 4, pp. 991-994, 2001.
- [DT5] J. P. Deyst, N. G. Paulter, T. Dabóczy, G. N. Stenbacken, and T. M. Souders, "A Fast Pulse Oscilloscope Calibration System," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement Vol. 47, No. 5, pp. 1037-1041, 1998.
- [DT6] T. Dabóczy, "Uncertainty of Signal Reconstruction in the Case of Jittery and Noisy Measurements," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 47, No. 5, pp. 1062-1066, 1998.

- [DT7] T. Dabóczy, "Nonparametric Identification Assuming Two Noise Sources. A Deconvolution Approach," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 47, No. 4, pp. 828-832, 1998.
- [DT8] T. Dabóczy and I. Kollár, "Multiparameter optimization of Inverse Filtering Algorithms," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 45, No. 2, pp. 417-421, 1996.

### **Nemzetközi részvételű konferenciakiadványok**

- [DT9] T. Dabóczy, "Signal-path compensation in measurement technique: An overview," International Conference on Innovative Technologies: IN-TECH 2013. 2013.09.10-2013.09.12. Budapest, Magyarország, 2013, pp. 261-265.
- [DT10] T. Dabóczy, "Robust Adaptive Fourier Analyzer," International Conference on Innovative Technologies: IN-TECH 2013, 2013.09.10-2013.09.12, Budapest, Magyarország, 2013, pp. 257-260.
- [DT11] T. Dabóczy, "Increasing the Robustness of the Resonator Based ADC Testing," IEEE I2MTC 2013, 2013 May 6-9, Minneapolis, USA, 2013, pp. 353-358.
- [DT12] T. Dabóczy, "Robust ADC Testing With Very Long Time Records," IEEE I2MTC 2012, 2012.05.13-2012.05.16, Graz, Ausztria, 2012, pp. 2651-2655.
- [DT13] T. Dabóczy and A. Bódis-Szomorú, "Nonparametric Identification and Signal Reconstruction as Two Consecutive Deconvolution Steps," IEEE IMTC 2005, 2005.05.17-2005.05.19, Ottawa, Kanada, 2005, pp. 915-919.
- [DT14] T. Dabóczy and T. B. Bakó, "Inverse Filtering of Optical Images," IEEE IMTC 2000, 2000.05.01-2000.04.04, Baltimore, USA, 2000, pp. 370-374.
- [DT15] T. Dabóczy, "Time Domain Uncertainty Bound of Signals Reconstruction in Case of Jittery and Noisy Measurements," IEEE IMTC 1998, 1998.05.19-1998.05.21, St. Paul, USA, 1998, pp. 1296-1301.
- [DT16] J. P. Deyst, M. Souders, N. Paulter, T. Dabóczy, and G. Stenbacken, "A Fast Pulse Oscilloscope Calibration System," IEEE IMTC 1998, 1998.05.19-1998.05.21, St. Paul, USA, 1998, pp. 166-171.
- [DT17] T. Dabóczy, "Deconvolution Assuming Two Noise Sources," IEEE IMTC 1997, 1997.05.19-1997.05.21, Ottawa, Kanada, 1997, pp. 408-413.
- [DT18] T. Dabóczy and I. Kollár, "Multiparameter Optimization of Inverse Filtering Algorithms," IEEE IMTC 1995, 1995.04.24-1995.04.26, Waltham, USA, 1995, pp. 482-487.

## **7. A tézisekhez és a témakörhöz kapcsolódó további saját publikációk**

### **Lektorált impaktfaktoros nemzetközi folyóiratcikkek:**

- [DT19] C. F. Hajdu, C. Zamantzas, and T. Dabóczy, "A resource-efficient adaptive Fourier analyzer," Journal of Instrumentation, Vol. 11, Paper P10014, pp. 1-15, 2016.
- [DT20] B. Renczes, I. Kollár, and T. Dabóczy, "Efficient Implementation of Least Squares Sine Fitting Algorithms," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 65, No. 12, pp. 2717-2724, 2016.
- [DT21] T. B. Bakó and T. Dabóczy, "Reconstruction of Nonlinearly Distorted Signals with Regularized Inverse Characteristics," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 51, No. 5, pp. 1019-1022, 2002.

### **Lektorált nemzetközi folyóiratcikkek:**

- [DT22] I. Kocsis, Á. Tóth, Z. Szatmári, T. Dabóczy, A. Pataricza and G. Guta, "Towards Cyber-Physical System Technologies over Apache VCL," International Journal of Cloud Computing, Vol. 5, No. 1-2, pp. 91-111, 2016.

## Lektorált hazai idegennyelvű folyóiratcikkek:

- [DT23] C. F. Hajdu, T. Dabóczi, and C. Zamantzas, "Possibilities for On-line Detector Connectivity Checks in Beam Loss Monitoring Systems," Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 61, No. 1, pp. 54-61, 2017.
- [DT24] Z. Gál, B. Almási, T. Dabóczi, R. Vida, I. Oniga, S. Baran and I. Farkas Z., "Internet of Things: Application Areas and Research Results of the FIRST Project," Infocommunications Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 37-34, 2014.

## Könyvrészlet

- [DT25] A. Bódis-Szomorú, T. Dabóczi, and Z. Fazekas, "Calibration and Sensitivity Analysis of a Stereo Vision-Based Driver Assistance System," in Stereo vision. Vienna: InTech Education and Publishing, 2008, pp. 1-26.

## Nemzetközi részvételű konferenciakiadványok

- [DT26] F. Hajdu, T. Dabóczi, and C. Zamantzas, "Possibilities for Modeling a Signal Structure Within a Fourier Analyzer," Proc. of the 24th PhD Mini-Symposium, 2017.01.30-2017.01.31. Budapest: BME MIT, 2017, pp. 38-41.
- [DT27] F. Hajdu, C. Zamantzas, and T. Dabóczi, "Development of a Method for Continuous Functional Supervision of BLM Systems," IBIC2016. Barcelona, Spanyolország, 2016.09.11-15., 2017, pp. 90-93.
- [DT28] F. Hajdu, T. Dabóczi, and C. Zamantzas, "On-line system supervision of beam loss monitoring systems with sinusoidal excitation," XXI IMEKO World Congress, Prága, Csehország, 2015.08.30-09.04, 2015, pp. 1176-1180.
- [DT29] A. Szarvas, Cs. Erdős, and T. Dabóczi, "Composability of Cyber-Physical Systems," Future Internet Services. 2014.12.14-17. Veszprém, Magyarország, 2014, pp. 1-6.
- [DT30] I. Kocsis, Á. Tóth, Z. Szatmári, T. Dabóczi, A. Pataricza and G. Guta, "Towards Cyber-Physical System Technologies over Apache VCL," 2nd International IBM Cloud Academy Conference. 2014.05.08-2014.05.09, Atlanta, USA, 2014, pp. 1-10.
- [DT31] L. Velinszky and T. Dabóczi, "Optimal course calculation for sailing vessels," International Conference on Innovative Technologies: IN-TECH 2013, 2013.09.10-12, Budapest, Magyarország, 2013, pp. 225-228.
- [DT32] T. Dabóczi, A. Pataricza, G. Strausz, and D. Varró, "Next Generation Embedded Systems," AWSN, 2013.04.15, Debrecen, Magyarország, 2013, pp. 47-52.
- [DT33] T. Kovács házy, G. Wacha, T. Dabóczi, Cs. Erdős, and A. Szarvas, "System Architecture for Internet of Things with the Extensive Use of Embedded Virtualization," IEEE CogInfoCom. 2013.12.02-05. Budapest, 2013, pp. 549-554.
- [DT34] T. Dabóczi and A. Kalvach, "Mobile speed and position sensor for home health monitoring based on accelerometer signals," BIOMED, 2012.01.31-2012.02.04, Vilamoura, Portugália, 2012, pp. 350-354.
- [DT35] A. Bódis-Szomorú and T. Dabóczi, "Optimization methods to calibrate a stereo rig with increased accuracy for vehicular applications," IEEE I2MTC 2012, 2012.05.13-2012.05.16, Graz, Ausztria, 2012, pp. 973-978.
- [DT36] A. Kalvach and T. Dabóczi, "Estimation of Inclination Angle for Balancing Robots Based on Physical Model," IEEE I2MTC 2012, 2012.05.13-2012.05.16, Graz, Ausztria, 2012, pp. 1417-1422.
- [DT37] A. Zenta and T. Dabóczi, "Online parameter estimation of permanent magnet synchronous machines by means of window LS optimization," ECC 2009. Budapest, 2009. 08. 23-26, 2009, pp. 591-596.
- [DT38] A. Zentai and T. Dabóczi, "Using Multi Dimensional Grid to identify a Permanent Magnet Synchronous Machine Model," IEEE SICE, 2008.12.04, Nagoya, Japán, 2008, pp. 42-47.

- [DT39] A. Zentai and T. Dabóczy, "Offline Parameter Estimation of Permanent Magnet Synchronous Machines by means of LS Optimization," IEEE SICE. 2008.12.04 Nagoya, Japan, 2008, pp. 36-41.
- [DT40] A. Zentai and T. Dabóczy, "Model based torque estimation of Permanent Magnet Synchronous Machines," IEEE SDEMPED, 2007.09.06-2007.09.08, Cracow, Lengyelország, 2007, pp. 178-181.
- [DT41] A. Bódis-Szomorú, T. Dabóczy, and Z. Fazekas, "A Far-Range Off-line Camera Calibration Method for Stereo Lane Detection Systems," IEEE IMTC 2007, 2007. 05. 01-03, Varsó, Lengyelország, 2007, pp. 1-6.
- [DT42] A. Zentai and T. Dabóczy, "Improving INFORM calculation method on permanent magnet synchronous machines," IEEE IMTC 2007, 2007.05.01-03, Varsó, Lengyelország, 2007, pp. 1-6.
- [DT43] A. Zentai and T. Dabóczy, "Improving Motor Current Control Using Decoupling Technique," EUROCON 2005, 2005.11.21-24, Belgrád, 2005, pp. 354-357.
- [DT44] A. Görgényi, L. Sujbert, I. Bogár, K. Molnár, and T. Dabóczy, "DSP-based Electromagnetic Flowmeter with Sinusoidal Excitation," IEEE IMTC 2005. 2005.05.17-2005.05.19. Ottawa, Kanada, 2005, pp. 1023-1026.
- [DT45] T. B. Bakó and T. Dabóczy, "Unbiased Reconstruction of Nonlinear Distortions," IEEE IMTC 2002, Anchorage, USA, 2002.05.21-2002.05.23., 2002, pp. 1099-1102.
- [DT46] T. B. Bakó, T. Dabóczy, and B. A. Bell, "Automatic Compensation of Nonlinear Distortions," IEEE IMTC 2002. Anchorage, USA, 2002.05.21-23, 2002, pp. 1321-1325.
- [DT47] T. Bakó, B. Bank, and T. Dabóczy, "Restoration of Nonlinearly Distorted Audio with the Application to Old Motion Pictures," AES 2001, Budapest, Magyarország, 2001.10.05-07., 2001, pp. 191-198.
- [DT48] T. B. Bakó and T. Dabóczy, "Reconstruction of Nonlinearly Distorted Signals with Regularized Inverse Characteristics," IEEE IMTC 2001, Budapest, Magyarország, 2001.05.21-23., 2001, pp. 1565-1569.
- [DT49] Á. Jobbágy, L. Gyöngy, and T. Dabóczy, "Increasing the accuracy of a TV based motion analysis system," IMEKO TC-13, 1995.09.06-09, Stará Lesna, Szlovákia, 1995, pp. 385-387.

### Helyi konferenciák:

- [DT50] A. Bódis-Szomorú and T. Dabóczy, "High-precision ground-truth data for evaluating dense stereo and optical flow algorithms," KÉPAF 2011, 2011.01.25-28, Szeged, Magyarország, 2011, pp. 1-14.
- [DT51] A. Bódis-Szomorú and T. Dabóczy, "A normalizált, 8-pontos algoritmus perturbációanalízise egy újabb szemszögből," KÉPAF 2011, 2011.01.25-28, Szeged, Magyarország, 2011, pp. 1-14.
- [DT52] A. Bódis-Szomorú, T. Dabóczy, and Z. Fazekas, "A Lane Detection Algorithm based on Wide-Baseline Stereovision for Advanced Driver Assistance," KÉPAF 2009, January 28-30, 2009, Budapest, Hungary, 2009, pp. 1-10.
- [DT53] A. Zentai and T. Dabóczy, "Szenzor nélküli rotor szöghelyzet meghatározó eljárás javítása változó reluktanciájú szinkron villamos gépeken," Tavaszi Szél 2007, Budapest, 2007. 05. 17-20, 2007, pp. 153-162.

## 8. A témakörhöz tartozó legfontosabb irodalom

- [1] A. N. Tikhonov and V. Y. Arsenin, *Solution of ill-posed problems*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1977.
- [2] W. T. Higgins, "A comparison of complementary and Kalman filtering," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-11, No. 3., May, pp. 321-325, 1975.
- [3] S. Challa and D. Koks, "Bayesian and Dempster-Shafer fusion," *Sadhana*, vol. 29, no. 2, April, pp. 145-174, 2004.

- [4] N. H. Younan, A. B. Kopp, D. B. Miller, and C. D. Taylor, "On correcting HV impulse measurements by means of adaptive filtering and deconvolution," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 6, No. 2, pp. 501-506, 1990.
- [5] C. W. Groetsch, *The Theory of Tikhonov Regularization for Fredholm Equations of the First Kind*. Boston: Pitman, 1984.
- [6] N. Wiener, *Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1949.
- [7] A. T. Walden, "Deconvolution by modified Wiener filtering: Interpretation for an imperfectly known wavelet," Seattle, Washington 98195 USA, Technical Report, 1986.
- [8] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *J. Basic Eng. Trans. ASME, Series D*, Vol. 982, No. 1, pp. 35-45, 1960.
- [9] J. V. Candy and J. E. Zicker, "Deconvolution of noisy transient signals: A Kalman filtering application," in *Proceedings of IEEE conf. on Decision and Control*, Orlando, FL, USA, CH1788-9/82, 1982, pp. 211-216.
- [10] D. Henderson, A. G. Roddie, J. G. Edwards, and H. M. Jones, "A deconvolution technique using least-squares model-fitting and its application to optical pulse measurement," NTIS, Technical Report, 1988.
- [11] S. K. Lehman, "Deconvolution Using a Neural Network," NTIS No. DE91007114/HDM, Report No. UCRL-ID-195439, NTIS Report, 1990.
- [12] G. Péceli, "A Common Structure for Recursive Discrete Transforms," *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. CAS-33, No. 10, Oct., pp. 1035-1036, 1986.
- [13] F. Nagy, "Measurement of signal parameters using nonlinear observers," *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, Vol. IM-41, Febr., pp. 152-155, 1992.
- [14] A. Ronk, "Analysis and Reproduction of a Signal's Periodic Components by Means of an Extended Block-Adaptive Fourier Analyzer," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 52, No. 1, Febr., pp. 13-19, 2003.
- [15] A. Ronk, "Transients in adaptive Fourier analysers," *Proc. Estonian Academy of Sciences, Engineering*, 2004, Vol. 1, No. 3, pp. 209-226, 2004.
- [16] G. Simon and G. Péceli, "Convergence Properties of an Adaptive Fourier Analyzer," *IEEE Trans. on Circuits and Systems-II*, Vol. 46, No. 2, Feb., pp. 223-227, 1999.
- [17] C. Merla, A. Paffi, F. Apollonio, S. Orcioni, and M. Liberti, "Portable System for Practical Permittivity Measurements Improved by Homomorphic Deconvolution," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 3, pp. 514-521, Mar. 2017.
- [18] H. Ha, Y. Bok, K. Joo, J. Jung, and I. S. Kweon, "Accurate Camera Calibration Robust to Defocus Using a Smartphone," in *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 7-13 Dec. 2015, Santiago, Chile, 2015, pp. 828-836.
- [19] M. M. Teshnizi and A. Shirazi, "Attitude estimation and sensor identification utilizing nonlinear filters based on a low-cost MEMS magnetometer and sun sensor," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 30, no. 12, pp. 20-33, Dec. 2015.
- [20] F. Attivissimo, N. Giaquinto, and M. Savino, "Low-cost accurate characterization of FM sine wave generators," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 2, pp. 384-389, Apr. 1998.
- [21] N. Anantrasirichai, W. Hayes, M. Allinovi, D. Bull, and A. Achim, "Line Detection as an Inverse Problem: Application to Lung Ultrasound Imaging," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. PP (Early Access), no. 99, pp. 1-12, Jun. 2017.
- [22] C. Bai, et al., "Pulse-Inversion Subharmonic Ultrafast Active Cavitation Imaging in Tissue Using Fast Eigenspace-Based Adaptive Beamforming and Cavitation Deconvolution," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 64, no. 8, pp. 1175-1193, Aug. 2017.

- [23] A. Kazemipour, et al., "Fast and Stable Signal Deconvolution via Compressible State-Space Models," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. PP (Early Access), no. 99, pp. 1-12, 2017.
- [24] W. Ding, X. Liu, D. Xu, D. Zhang, and Z. Zhang, "A Robust Detection Method of Control Points for Calibration and Measurement With Defocused Images," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 10, pp. 2725-2735, Oct. 2017.
- [25] Y. Tao, M. Xu, F. Zhang, B. Du, and L. Zhang, "Unsupervised-Restricted Deconvolutional Neural Network for Very High Resolution Remote-Sensing Image Classification," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. PP (Early Access), no. 99, pp. 1-19, Aug. 2017.
- [26] T. C. Yang, "Deconvolved Conventional Beamforming for a Horizontal Line Array," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. PP (Early Access), no. 99, pp. 1-13, 2017.
- [27] O. Hotel, J.-P. Poli, C. Mer-Calfati, E. Scorsone, and S. Saada, "SAW sensor's frequency shift characterization for odour recognition and concentration estimation," *IEEE Sensors Journal*, vol. PP (Early Access), no. 99, pp. 1-8, Sep. 2017.
- [28] S. Ling and T. Strohmer, "Blind Deconvolution Meets Blind Demixing: Algorithms and Performance Bounds," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 63, no. 7, pp. 4497-4520, Jul. 2017.
- [29] S. Mohammadi, N. Zuckerman, A. Goldsmith, and A. Grama, "A Critical Survey of Deconvolution Methods for Separating Cell Types in Complex Tissues," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 2, pp. 340-366, Feb. 2017.
- [30] J. Dong, A. Locquet, and D. S. Citrin, "Terahertz Quantitative Nondestructive Evaluation of Failure Modes in Polymer-Coated Steel," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 23, no. 4, pp. 1-7, Jul. 2017.
- [31] J. Dong, X. Wu, A. Locquet, and D. S. Citrin, "Terahertz Superresolution Stratigraphic Characterization of Multilayered Structures Using Sparse Deconvolution," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 260-267, May 2017.
- [32] C. Laroche, H. Papadopoulos, M. Kowalski, and G. Richard, "Drum extraction in single channel audio signals using multi-layer Non negative Matrix Factor Deconvolution," in *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 5-9 March 2017, New Orleans, LA, USA, 2017, pp. 46-50.
- [33] W. L. Gans, "Dynamic calibration of waveform recorders and oscilloscopes using pulse standards," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 39, no. 6, pp. 952-957, Dec. 1990.
- [34] P. D. Hale, et al., "Traceable Waveform Calibration With a Covariance-Based Uncertainty Analysis," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 10, pp. 3554-3568, Oct. 2009.
- [35] D. D. S. Santana, C. M. Furukawa, and N. Maruyama, "Sensor Fusion with Low-Grade Inertial Sensors and Odometer to Estimate Geodetic Coordinates in Environments without GPS Signal," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 4, pp. 1015-1021, Jun. 2013.
- [36] K. Jo, K. Chu, and M. Sunwoo, "Interacting Multiple Model Filter-Based Sensor Fusion of GPS With In-Vehicle Sensors for Real-Time Vehicle Positioning," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 329-343, Mar. 2012.
- [37] V. Bhateja, H. Patel, A. Krishn, A. Sahu, and A. Lay-Ekuakille, "Multimodal Medical Image Sensor Fusion Framework Using Cascade of Wavelet and Contourlet Transform Domains," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 12, pp. 6783-6790, Dec. 2015.
- [38] S. Kim, H. Kim, W. Yoo, and K. Huh, "Sensor Fusion Algorithm Design in Detecting Vehicles Using Laser Scanner and Stereo Vision," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 1072-1084, Apr. 2016.

- [39] A. D. Pizzo, C. Olivieri, F. Ciancetta, M. Tursini, and N. Rotondale, "Development issues of a Neural observer-based and fault-adaptive sensorless strategy for a multiphase BLDC motor," in *Proceedings of 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 18-20 June 2014, Ischia, Italy, 2014, pp. 1166-1173.
- [40] C. Olivieri, "A fault-adaptive and observer-based sensorless strategy for a fault-tolerant five-phase BLDC motor," in *Proceedings of 2013 IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives and Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (SLED/PRECEDE)*, 17-19 Oct. 2013, München, Germany, 2013, pp. 1-8.
- [41] I. Kim, H. Kim, T. Kwon, and H. Lee, "Fail-Safe Control Strategy of Traction Motor in Electric Mobility with Sensorless Control Scheme," in *Proceedings of IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 6-9 May 2012, Yokohama, Japan, 2012, pp. 1-5.
- [42] A. Maalouf, L. Idkhajine, S. L. Ballois, and E. Monmasson, "Field programmable gate array-based sensorless control of a brushless synchronous starter generator for aircraft application," *IET Electric Power Applications*, vol. 5, no. 1, pp. 181-192, Jan. 2011.
- [43] Y. Li and B. Hannaford, "Gaussian Process Regression for Sensorless Grip Force Estimation of Cable-Driven Elongated Surgical Instruments," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 3, pp. 1312-1319, Jul. 2017.
- [44] P. H. Van Cittert, "Zum Einfluß der Spaltbreite auf die Intensitätsverteilung in Spektrallinien," *Zeitschrift für Physik*, Vol. 69., pp. 298-308, 1930.
- [45] P. B. Crilly, "A quantitative evaluation of various iterative deconvolution algorithms," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 40, No. 3, pp. 558-562, 1991.
- [46] P. A. Jansson, *Deconvolution with applications in spectroscopy*. San Diego: Academic Press, 1984.
- [47] T. Dhaene, L. Martens, and D. De Zutter, "Generalized iterative frequency domain deconvolution technique," in *Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC 1993*, May 18-20, 1993, 93CH3291-0, Irvin, CA, USA, 1993, pp. 85-87.
- [48] P. C. Hansen, "Analysis of Discrete Ill-Posed Problems by Means of the L-Curve," *SIAM Review*, Vol. 34, No. 4, Dec., pp. 561-580, 1992.
- [49] V. A. Morozov, *Methods for Solving Incorrectly Posed Problems*. New York: Springer, 1984.
- [50] V. Székely, "Identification of RC Networks by Deconvolution: Chances and Limits," *IEEE Trans. on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 45, no. 3, pp. 244-258, 1998.
- [51] G. H. Golub, M. Heath, and G. Wahba, "Generalized Cross-Validation as a Method for Choosing a Good Ridge Parameter," *Technometrics*, vol. 21, no. 2, pp. 215-223, 1979.
- [52] D. P. O'Leary, "Near-optimal parameters for Tikhonov and other regularization methods," *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 23, no. 4, pp. 1161-1171, 2001.
- [53] T. M. Souders, D. R. Flach, C. Hagwood, and G. L. Yang, "The effect of timing jitter in sampling systems," *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, Vol. 39, No. 1, Feb., pp. 80-85, 1990.
- [54] C. Narduzzi, "Inverse Filtering With Signal-Adaptive Constraints," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 54, No. 4, Aug., pp. 1553-1559, 2005.